基于无人机遥感的岛状盐沼潮沟与植被发育特征研究

孙家庆[1,2]， 梁书秀[1]， 孙昭晨[1]， 陈柯欣[1]， 马龙坤[1]

（1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2.中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222）

摘　要: 潮沟和植被是盐沼湿地系统的重要组成部分,探究二者在发育过程中相互作用形成的不同形态特征,有助于理解盐沼湿地生态系统的稳定性机制。本研究选取辽河口门头岗岛状盐沼,基于厘米级无人机遥感影像并结合 GF-2 卫星高分辨率遥感影像,采用地理信息系统（GIS）技术,获取了滩面 75 条潮沟系统和高精度的地形高程数据以及盐沼植被分布情况。通过对潮沟系统形态特征参数与植被覆盖度（Fractional Vegetation Coverage, *FVC*）的计算和系统性分析,得到了潮沟等级发育率与发育时间,以及潮沟曲率、密度与植被覆盖度间的相对关系,并发现了基于 Gravelius 分级法得到的 1、2 级潮沟夹角近似呈正态分布以及翅碱蓬在潮沟边缘的多种分布模式。这些发现揭示了潮沟与植被在不同发育阶段的形态特征,可为辽河口盐沼湿地在潮沟构建等方面的保护和修复工作提供理论参考。

关键词: 岛状盐沼; 无人机; 潮沟; 翅碱蓬; 辽河口

中图分类号: P737.1; X87　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1007-6336(2025)03-0377-10

Study on the development characteristics of tidal creek and vegetation in island salt marsh based on UAV remote sensing

SUN Jiaqing[1,2], LIANG Shuxiu[1], SUN Zhaochen[1], CHEN Kexin[1], MA Longkun[1]

(1.State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2.CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Tidal creeks and vegetation are essential components of salt marsh wetland systems. Exploring the different morphological characteristics formed by the interaction between them during development is helpful to understand the stability mechanism of salt marsh wetland ecosystem. This study took the MentouGang island salt marsh in Liaohe Estuary as the research object. Based on centimeter-level Unmanned Aerial Vehicle(UAV) remote sensing images and GF-2 satellite high-resolution remote sensing images, GIS technology was used to extract 75 tidal creek systems , along with high-precision elevation data and the distribution of salt marsh vegetation. The study involved the calculation and systematic analysis of morphological parameters of tidal creek systems and vegetation fractional vegetation coverage. Relationships between tidal creek development rate and development time, as well as tidal creek curvature, density, and vegetation coverage, were obtained. It was found that the angle between the first and second order tidal creeks, based on the Gravelius classification method, is almost normal distribution, and multiple distribution patterns of *Suaeda salsa* along the edges of

收稿日期: 2024-02-23, **修订日期:** 2024-05-31

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1407700)

作者简介: 孙家庆(1996—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋空间资源和再生能源的开发利用, E-mail: 2961358245@qq.com

通信作者: 梁书秀(1972—), 女, 辽宁凤城人, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋生态修复理论与技术研究, E-mail: sxliang@dlut.edu.cn

tidal creeks were identified. These findings revealed the development characteristics of tidal creeks and vegetation in different environments. They provide theoretical references for the protection and restoration efforts concerning tidal creeks construction in the Liaohe Estuary salt marsh wetlands.

Key words: island salt marsh; Unmanned Aerial Vehicle; tidal creeks; Suaeda salsa; Liaohe Estuary

滨海盐沼是位于陆地与海洋生态系统间的过渡地带，它可以提供广泛的生态系统服务[1]，同时也为野生动物提供稀有和独特的栖息地，并为鱼类、贝类和甲壳类动物以及鸟类提供重要的生存空间。然而，盐沼系统易受当前自然气候变化和人类干扰的影响[2]，盐沼的保护与修复正受到国际学者的广泛关注[3-4]。潮沟是盐沼上最活跃的微地貌单元[5]，是盐沼与外界不断交换沉积物、营养盐和污染物的重要通道[6]。盐沼植被的存在会在一定程度上影响潮沟系统的发育[2]。在盐沼湿地生态系统中，潮沟与植被之间的相互作用对其整体健康和功能具有重要影响。因此，深入理解其在自然状态下形成的发育特征对于生态保护和资源管理极为重要。相比于传统的滨海盐沼，岛状盐沼地理位置相对隔绝，受到的人类干扰较少，其上的潮沟和植被的发育也更接近自然状态，是研究自然条件下潮沟和植被相互作用的绝佳地点。

目前，相关学者对盐沼中潮沟与植被的研究日益深入，许多研究结果表明潮沟与植被群落之间相互影响的反馈机制是复杂且微妙的[7]：植被不仅可以稳定沉积物，还可以促进侵蚀和潮沟发育[8]；潮沟通过传递营养物质、改变土壤水盐梯度和影响种子传播等方式影响潮滩上的植被群落生长和演替[9-10]；植被分布表现出与潮沟距离的高度相关性[11]。此外，国外学者也关注到了潮沟与植被在岛状盐沼中的发育模式，如潮沟的曲率对其附近植被斑块的空间分布会产生显著影响，随着与潮沟距离的缩短，这种影响逐渐增强[12]；经过人为干预，如开挖和障碍物的移除后，潮沟周围的植被覆盖度和萌发率均有所提升[13]；盐沼植被可以通过调控潮流的速度和方向，进而影响潮沟的形态变化[14]。在盐沼湿地的恢复过程中，自然条件下稳定的潮沟和植被形态特征往往作为设计和恢复目标，以提升恢复速度和维持生态系统的稳定性。因此，探究岛状盐沼中潮沟和植被在自然状态下的发育特征对于保护和修复现存盐沼生态系统具有重要的意义。

在以往的研究中，由于盐沼系统面积广阔且滩面周期性淹没，研究人员往往采用野外调查[15-16]、无人机和卫星遥感影像解译[6, 9, 17-18]以及数值模拟[16]等方法来分析盐沼中潮沟和植被的发育特征。卫星遥感影像由于其广泛的覆盖范围和包含的多波段信息，为获取盐沼内大型潮沟及植被分布提供了便捷手段。然而，受限于空间分辨率，这种方法难以详细描绘主潮沟之外的次级潮沟分布。此外，由于卫星影像通常不提供地形高程信息，研究人员仍需进行人工地面测量。考虑到盐沼的广阔面积，这种方法的应用受到了实际操作的限制。相对于卫星遥感，无人机低空遥感是近年来兴起的新型监测技术，它兼具高分辨率和灵活性，可以提供更高分辨率的影像和更精确的地形高程数据，使得无人机遥感获取的潮沟数据在完整性和精确性方面具有显著优势。通过综合利用无人机遥感和卫星遥感技术，研究人员能够进行更为详尽和精细的地形及植被分布调查，从而大幅提升了数据的质量和研究的可靠性。

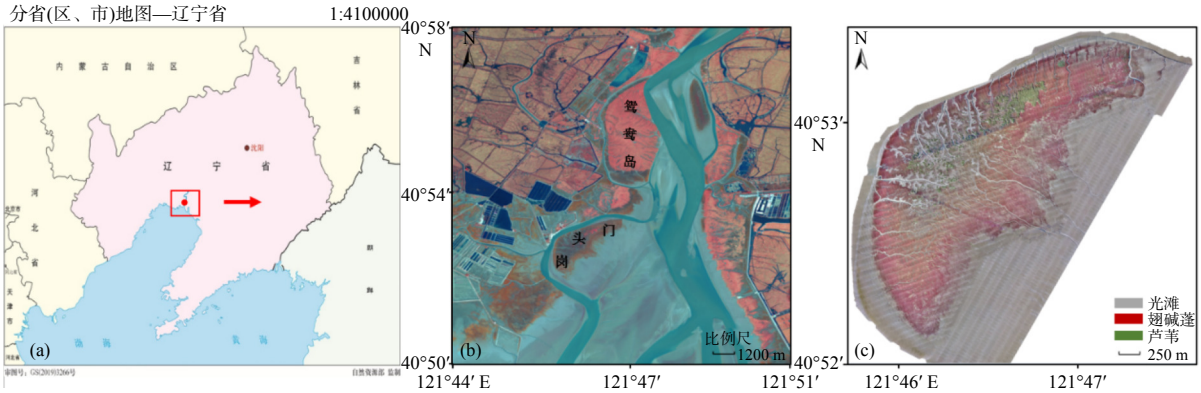
本研究以辽河口门头岗岛状盐沼为研究对象，利用无人机遥感技术获取其厘米级光学图像及地形高程，同时结合高分辨率卫星影像，基于GIS 技术，探究 2020—2023 年门头岗潮沟形态和植被分布的变化特征，总结并分析了岛状盐沼自然状态下潮沟与植被的发育特点，可为辽河口盐沼湿地的保护和修复工作提供借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

门头岗滩（40°52′N—40°54′N, 121°45′E—121°48′E）位于辽河下游入海口（图 1），滩面呈不规则楔形，形似人体“肝脏”，属于典型的离岸式岛状盐沼，总面积约为 340 ha，最高潮时全滩

被海水浸没。滩面潮沟网络密集复杂，植被覆盖度较高，优势物种为翅碱蓬，滩面中部还分布有芦苇。翅碱蓬成熟后整株呈红色，具有很高的观赏和生态价值，盘锦红海滩风景区也因此而得名。辽河口潮汐为典型不规则半日潮，该区域气候为温带半湿润季风气候[19]。辽河从盘锦入海后，受河流来沙和沿岸输沙的影响，河口沉积地貌发育明显。辽河口目前整体处于淤积的趋势，河口拦门沙、江心洲、潮滩不断淤积发育[20]，典型的有盖州滩、鸳鸯岛等，门头岗滩也是由此发育而成。



注：(a)、(b) 为研究区位置，(c)为研究区无人机航拍图

图 1　门头岗滩位置

Fig. 1　The location of MentouGang

1.2　研究方法

1.2.1　数据来源

研究选取地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）2020 年 7 月与 2021 年 10 月 2 个时相的 GF-2 号卫星 1 m 分辨率的全色波段和 4 m 分辨率的多光谱波段遥感影像，以及 2013 年 10 月 Landsat 8 OLI_TIRS 卫星 15 m 分辨率的遥感影像作为数据源，影像信息见表 1。使用 ENVI5.3 中的 NNDiffuse Pan Sharpening 方法进行 GF-2 卫星全色波段和多光谱波段的影像融合，得到 2 个时相的分辨率为 1 m、包含 4 个波段（0.491 μm、0.555 μm、0.665 μm、0.821 μm）的融合影像。同时于 2022 年 10 月中旬、2023 年 8 月下旬和 2023 年 10 月下旬采用大疆经纬 M300RTK 航测无人机负载云台相机禅思 P1、禅思 L1 进行了 3 次拍摄。无人机选取退潮时天气晴朗、日照充足、风速较低的时段工作，飞行高度 100 m，图像分辨率 0.02 m，获取研究区红、绿、蓝三光谱光学图像（图 1c）和高程数据。

表 1　GF-2 和 Landsat 8 OLI_TIRS 卫星遥感影像信息

Tab.1　Information from GF-2 and Landsat 8 OLI_TIRS satellite remote sensing images

序号	影像编号	分辨率	谱段信息
1	GF2_PMS1_E121.8_N41.0_20200725_L1A0004948386-MSS1	1 m	全色波段
2	GF2_PMS1_E121.8_N41.0_20200725_L1A0004948386-PAN1	4 m	多光谱
3	GF2_PMS1_E121.8_N40.9_20211017_L1A0005963765-MSS1	1 m	全色波段
4	GF2_PMS1_E121.8_N40.9_20211017_L1A0005963765-PAN1	4 m	多光谱
5	LC81200322013303LGN00	15 m	全色波段

注：谱段信息中全色波段为0.45 ~ 0.90 μm；多光谱波段为0.45 ~ 0.52 μm、0.52 ~ 0.59 μm、0.63 ~ 0.69 μm和0.77 ~ 0.89 μm

1.2.2　潮沟提取与形态特征参数计算

根据 2022 年 10 月下旬无人机拍摄的门头岗滩影像（图 1c），研究区存在大量宽度在 0.5 m 以内的潮沟，使用传统算法[6-7] 难以精准提取，且

门头岗滩潮沟数量较少，因此采用目视解译并结合 ArcGIS 中 ArcScan 模块矢量化潮沟，对其进行潮沟提取和潮沟网络形态参数的计算。选取潮沟等级、等级发育率、长度、密度、曲率和 2 级潮沟夹角等参数表征门头岗滩盐沼潮沟的形态特征。潮沟等级采用 Gravelius 分级法[21]，潮沟系统中最大的、直接与海洋连通的潮沟为 1 级（主潮沟），直接汇入 1 级潮沟的为 2 级，以此类推直至分级完成。等级发育率（T_i）指 i 级潮沟中发育出 i+1 级的 i 级潮沟数量与总的 i 级潮沟数量的比值。研究使用 ArcGIS 中计算几何工具来测量潮沟中轴线的尺寸作为潮沟长度数据。潮沟密度是集水区单位面积内潮沟的长度，曲率则是潮沟长度和潮沟两端直线距离的比值，均使用 ArcGIS 计算获得。2 级潮沟夹角为潮沟系统中 2 级与 1 级潮沟在连接处的夹角，采用 ArcGIS 的测量工具计算矢量线的夹角获得。此外，潮沟和滩面的高程由无人机携带的激光雷达传感器（禅思 L1）测量，经大疆智图（DJI TERRATM）软件处理后可在 ArcGis 读取。

1.2.3 植被覆盖度计算

根据野外实地观测和航拍影像确定，研究区滩面主要生长的植被为翅碱蓬和芦苇，零星有米草分布。植被覆盖度的计算由 GF-2 号卫星提供的遥感影像完成。

本研究采用 ENVI5.3 中的波段运算模块获取研究区归一化植被指数（normalized difference vegetation index, *NDVI*），并根据 *NDVI* 值计算植被覆盖度（fractional vegetation coverage, *FVC*），*FVC* 是植被垂直投影到地面阴影面积占总体面积的百分比[22]。覆盖度是衡量植被生长情况的一个重要且常用的指标，它对于揭示某区域的水文、生态、环境、人类活动、气候等变化都具有十分重要的意义[22]，其表达式为：

$$NDVI=(NIR-Red)/(NIR+Red) \quad (1)$$

式中：*NIR*、*Red* 分别表示近红外和红光波段的反射率或像元值。

$$FVC=(NDVI-NDVI_{\min})/(NDVI_{\max}-NDVI_{\min}) \quad (2)$$

式中：$NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别表示研究区内 *NDVI* 的最大值和最小值。

2 结果与讨论

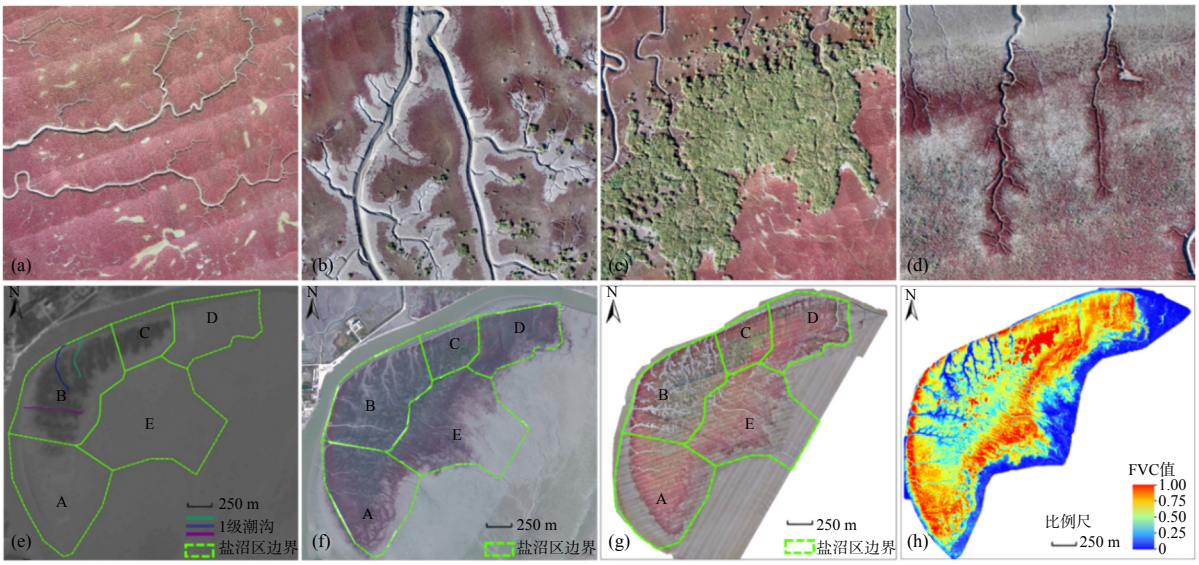
2.1 盐沼分区

门头岗滩受河流来沙和沿岸输沙的影响，不断淤积发育，形成了滩面中部高、南北两侧低的地形。以往研究普遍认为，盐沼高程或潮差是影响潮沟发育和植被分布的主要因素之一。为了凸显高程对潮沟–植被发育的影响，同时分析在高程变化较小的区域其他因素以及潮沟、植被之间的相互影响，研究按照高程差异将门头岗滩划分为不同的区域。此外，在 0.02 m 分辨率的航拍影像（图 1c）中可以观察到，滩面翅碱蓬和芦苇红绿分明。自南向北，植被的物种、覆盖度和与潮沟的距离存在明显的差异，具体如图 2a ~ 图 2d 所示。综合考虑盐沼高程和植被分布的特点，将盐沼从南向北划分为 A、B、C、D、E 五个区域（图 2g），以研究潮沟和植被在不同区域的形态特征。E 区与其他四区地理位置不同，位于盐沼东侧，由于水动力差异和拍摄区域不全等因素，本研究重点关注的区域为 A、B、C、D 四区。

根据无人机激光雷达数据，A 区平均高程为 2.01 m，仅有翅碱蓬分布且覆盖度均匀（图 2a）；B 区平均高程为 2.20 m，除翅碱蓬外，盐沼中心有簇状芦苇分布，翅碱蓬的生长也表现出与潮沟距离的强相关性（图 2b）；C 区平均高程为 2.24 m，翅碱蓬、芦苇混生且二者分布面积相当，芦苇呈密集片状生长（图 2c）；D 区平均高程为 2.10 m，优势物种仍是翅碱蓬且在潮沟边缘的分布规律与 B 区相反（图 2d）。门头岗受辽河来沙和沿岸输沙影响，滩面自中部向南北两侧不断淤积发育，中部的 B、C 区高程大于南北两侧的 A、D 区，也反映出 B、C 区盐沼的形成和发育时间早于 A、D 区。图 2e 与图 2f、图 2g 对比可以看出，2013 年门头岗盐沼的 A、D 和 E 区尚未发育出潮沟和植被。各区域植被覆盖度如图 2h 所示。其中 C 区植被覆盖度最大，其芦苇 *FVC* 为 1；A 区翅碱蓬密集区 *FVC* 大于 0.85；D 区 *FVC* 在 0.65 ~ 0.80；B 区翅碱蓬 *FCV* 小于 0.65，其零星芦苇斑块 *FVC* 大于 0.90。

2.2 潮沟的空间异质性

研究充分利用了多源数据各自的优势，

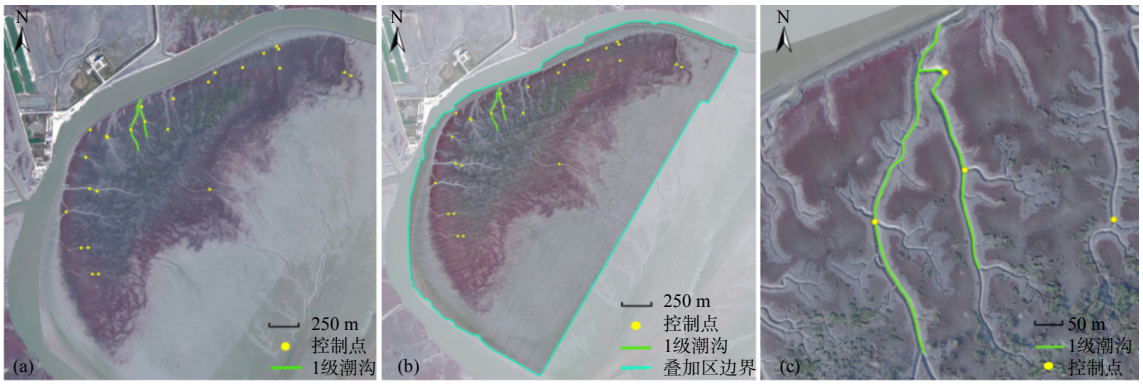


注：(a)～(d)选自门头岗滩 A～D 区，(e)～(g)为 2013 年、2021 年和 2022 年门头岗影像及分区结果，(h)为门头岗 2021 年植被 *FVC*

图 2　门头岗滩分区结果及各区域植被特征与覆盖度分布

Fig. 2　Results of MentouGang zoning and the characteristics of vegetation and *FVC* distribution in each area *FVC*

Landsat 8 OLI_TIRS 和 GF-2 卫星影像提供了 2013 年和 2020—2021 年的历史数据，并可通过波段信息计算植被 *FVC*；无人机影像则给出了 2022 年高精度的潮沟分布和厘米级的地形高程数据。对二者的解译结果进行比较，发现卫星影像由于分辨率的原因，高级潮沟往往无法辨认，图 3b 展示了 2021 年 10 月某低潮时段的 GF-2 卫星遥感影像与 2022 年 10 月 11 日 7:00—10:00 低潮时段无人机航拍影像的叠加效果，其中卫星影像的透明度设定为 35%。研究选定了卫星影像中 25 个位于潮沟转弯处及 2 级潮沟发育处的控制点，加载至无人机影像中，拟合率达到 100%。研究同时计算了卫星和无人机影像中绿色曲线位置的 1 级潮沟长度，分别为 683 m 和 684.6 m，相对误差为 0.23%。GF-2 卫星影像的 1 级潮沟与无人机影像呈现出高度一致性。

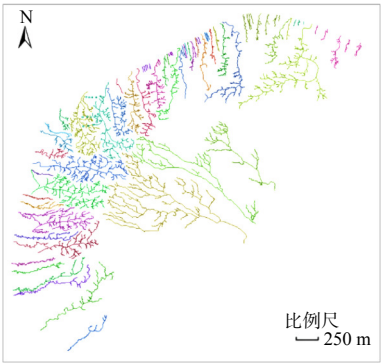


注：(a) 为 2021 年 GF-2 卫星遥感影像，(b)为 2021 年 GF-2 卫星影像与 2022 年无人机影像叠加，(c)为 叠加图中部放大视图

图 3　GF-2 卫星遥感影像与无人机影像解译结果叠加

Fig. 3　Overlay of GF-2 satellite remote sensing image with UAV image interpretation results

将汇入同一条 1 级潮沟的 2 级及以上潮沟(包括 1 级潮沟)定义为 1 个潮沟系统，不同潮沟系统间不交叉、不连通。共计 75 个潮沟系统，1229 条潮沟，如图 4 所示。各潮沟系统的形态特征参数，如等级、长度、密度、曲率和夹角等由于所处区域和发育时间不同，均表现出一定的异质性。



注: 不同颜色代表不同潮沟系统, 共 75 个

图 4 门头岗滩潮沟网络

Fig. 4 MentouGang tidal creek network

2.2.1 潮沟等级

门头岗滩潮沟网络发育复杂, 潮沟系统大致呈树状, 每个系统中 1 级潮沟连通海洋, 其余各级潮沟大致对称分布在各自上级潮沟的两侧。A ~ D 四区的潮沟分级、数量和发育下级潮沟的比例 T_i 等信息见表 2。

表 2 门头岗滩 A ~ D 区潮沟等级数据

Tab.2 Tidal creek grade data in A ~ D areas of MentouGang

分区	潮沟分级数量/条				发育下级潮沟比例		
	1级	2级	3级	4级	T_1	T_2	T_3
A	10	68	54	6	90%	26%	6%
B	14	109	253	175	93%	50%	25%
C	26	67	42	12	31%	24%	10%
D	18	99	81	26	56%	30%	14%

由表 2 可知, A ~ D 四区潮沟系统均发育到 4 级潮沟, 各潮沟发育下级潮沟的比例逐级下降。其中, B、D 区尽管高程和 *FVC* 都有较大差异, 但作为发育时间最长和最短的两个区域, 各级潮沟发育下级潮沟的比例在规律上呈现一定的相似性: 各级发育率 T_i 逐级减半。尤为明显的是 B 区, 其 1 级潮沟中有 93% 发育出 2 级潮沟; 2 级潮沟中有 50% 发育出 3 级潮沟; 3 级潮沟中有 25% 发育出 4 级潮沟, 各级发育率近似从 100% 逐级减半。A 区表现为 T_1 最大, 达到 90%, 接近 B 区, 但 T_2、T_3 明显下降。C 区平均高程最大(2.24 m), 芦苇、翅碱蓬混生, 芦苇生长区 *FVC* 均为 1, 除 A 区 T_3 外, C 区各级潮沟发育率均小于其他区域。

2.2.2 潮沟长度、密度

潮沟的长度和密度是反映一个区域潮沟发育成熟度的关键数据。表 3 反映了研究区潮沟长度分布特点: 除 B 区外, 潮沟长度均随着潮沟级数的升高而降低, A、D 区 1 级潮沟的长度占潮沟系统总长度的 40% 左右, C 区高达 60%, 而 A、D 区 1 级潮沟数量占总数量不足 10%, C 区也仅有 18%。B 区潮沟的数量和长度的高峰均在 2、3 级潮沟, 且 2、3 级潮沟长度占比达到 65%, 与之相对应的是 B 区的总潮沟密度也是四个区域中最大的, 达 33.4 km/km^2。

表 3 门头岗滩潮沟长度

Tab.3 Tidal creek length of MentouGang

分区	面积/ha	潮沟长度/km				
		1级	2级	3级	4级	合计
A	89.2	6.8	5.6	2.8	0.2	15.3
B	74.9	4.8	8.3	7.9	4.0	25.1
C	27.7	4.5	2.1	0.7	0.1	7.5
D	52.4	4.6	4.3	2.5	0.7	12.0

研究统计了各级潮沟的密度分布, 如图 5 所示。结果表明, A、D 区平均高程接近(2.01 ~ 2.10 m), 植被为翅碱蓬且 *FVC* 大于 0.65, 与之相对应的是 A、D 区各级潮沟长度、密度的变化规律相似且数值接近。B、C 区高程相比 A、D 区较大(2.20 ~ 2.24 m), 植被为芦苇和翅碱蓬混生, 两区域 *FVC* 相差较大, B 区除零星的芦苇斑块外, 其他区域 *FVC* 明显小于 C 区。此外, B、C 区各级潮沟长度、密度数值相差较大, 变化规律也明显

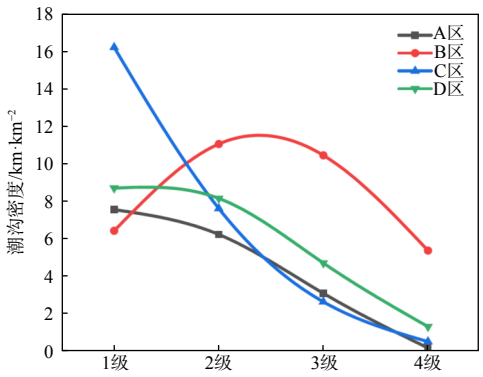


图 5 研究区各级潮沟密度分布

Fig. 5 Density distribution of tidal creeks at all levels in the study area

不同，B 区潮沟长度、密度峰值在 2、3 级潮沟，C 区则逐级减少。

2.2.3　潮沟分级曲率

研究统计了四区内各潮沟系统中不同级别的潮沟曲率，见表 4。结果表明：A 区平均曲率最大，B、C 区平均曲率较小，除 B 区外各区潮沟曲率随着潮沟级数的增加而减小，B 区 2 级潮沟曲率最大。考虑各区高程、植被物种及 *FVC* 的差异，可以发现，翅碱蓬 *FVC* 与潮沟曲率呈正相关，滩面高程与潮沟曲率呈负相关。

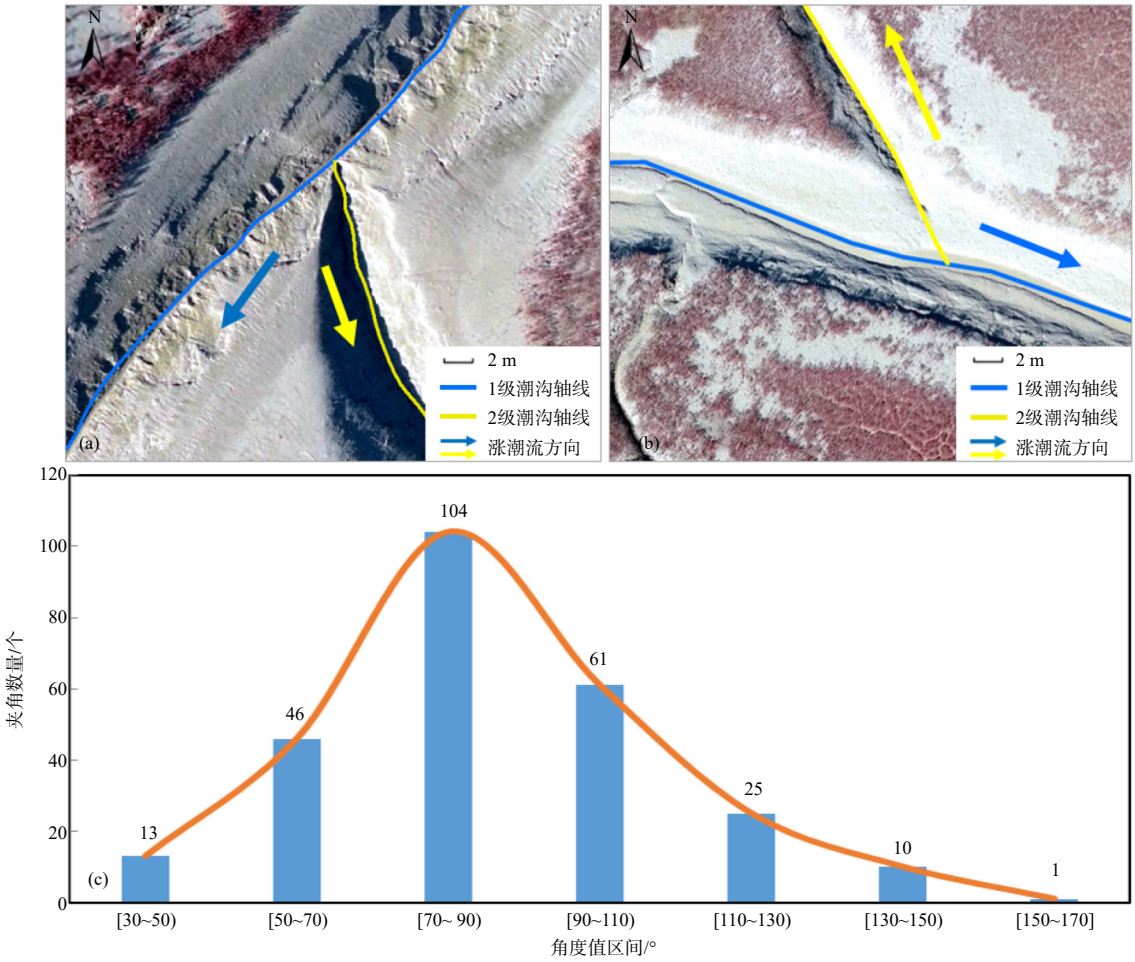
表 4　门头岗滩不同等级潮沟曲率

Tab.4　Tidal creek curvature of different grades in MentouGang

分区	1级	2级	3级	4级	均值
A	1.42	1.37	1.30	1.23	1.34
B	1.20	1.26	1.21	1.18	1.22
C	1.23	1.16	1.15	1.14	1.18
D	1.31	1.26	1.21	1.21	1.25

2.2.4　二级潮沟与主潮沟夹角

树状潮沟系统的 1、2 级潮沟间因地形、水流速度和植被分布等因素呈钝角或锐角相交[23]。研究统计了 A ~ D 四区所有潮沟系统的 2 级潮沟与主潮沟的夹角，如图 6 所示，结果表明：各区域最大夹角为 152°，最小夹角为 30°，此外，A ~ D



注：(a)锐角，(b)钝角，(c)滩面所有潮沟系统的 2 级潮沟与主潮沟夹角分布

图 6　门头岗滩 2 级潮沟与主潮沟夹角及其分布

Fig. 6　The distribution of the angle between level 2 tidal creek and main tidal creek in MentouGang

四区均表现为锐角数量大于钝角数量，平均角度为 86°。B 区锐角比例最低，锐角与钝角的数量比为 1.37，其他区域在 1.7 ~ 2.3，明显更高。

从统计结果可以看出，研究区内所有 2 级潮沟夹角接近正态分布且只有 B 区与全滩夹角分布形式一致。因此可以推测，潮沟系统中 2 级潮沟与主潮沟夹角随着发育时间的增加逐渐接近正态分布且峰值在 [70°~90°]。

2.3 植被的空间异质性

在 2.1 节中已经讨论过植被在门头岗滩不同区域的分布差异，植被的空间异质性也是对盐沼进行区域划分的依据之一。各区域除植被物种，即翅碱蓬和芦苇的差异外，作为门头岗盐沼的优势物种，翅碱蓬在滩面各区域的分布也呈现与潮沟距离的不同的相关性。从图 2a、图 2b 和图 2d 的对比中，我们发现翅碱蓬分布与潮沟边缘距离存在 3 种模式：(1)翅碱蓬分布与潮沟距离无明显相关性；(2)翅碱蓬集中在潮沟边缘；(3)翅碱蓬远离潮沟 5 ~ 10 m 后生长。此外，在研究期间我们发现了不同模式之间存在转化的趋势。在 2022 年 10 月无人机拍摄的画面中(图 7a)，D 区翅碱蓬集中在各潮沟系统的边缘生长，而 2023 年 10 月无人机拍摄的同一地点(图 7b)，翅碱蓬在滩面的分布已与潮沟距离无明显相关性，且有大量芦苇生长。

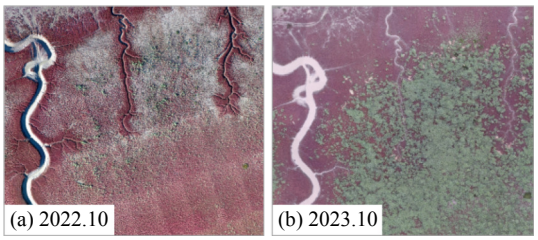


图 7 D 区植被分布 2022 年 10 月(a)和 2023 年 10 月(b)

Fig. 7 Distribution of vegetation in area D October 2022 (a) and October 2023 (b)

2.4 讨 论

本研究采用无人机遥感技术，系统地探究了岛状盐沼生态系统中潮沟与植被相互作用形成的不同形态特征。与传统卫星遥感相比，无人机遥感技术在捕捉地表细节方面表现出了明显的优势，其高分辨率图像提供了更为详细的潮沟及植被分布数据，弥补了卫星遥感分辨率低的局限性。尽管如此，无人机遥感技术也存在不足之处。无人机的飞行性能受天气条件的影响，特别是风速的限制，加之电池续航能力的制约，使得其有效的作业时间相对较短，从而减少了在广阔研究区域中的适用性。与传统的滨海盐沼相比，岛状盐沼的面积较小，如 2022 年门头岗岛状盐沼面积约为 3.4 km^2，仅占同时期黄河三角洲盐沼面积的 0.7%。此外，岛状盐沼的潮沟网络更加密集，植被覆盖度较高，光滩较少，如在黄河三角洲国家自然保护区，潮沟密度通常不超过 2.22 km/km^2，而门头岗岛状盐沼的各级潮沟总密度基本在 20 km/km^2 以上[24]。因此，鉴于岛状盐沼具有较小的区域范围和复杂的潮沟网络，使用无人机遥感技术进行研究显得格外关键。无人机遥感技术能够提供高分辨率图像和地形高程，精确捕捉生态结构的细节特征；而卫星遥感技术则能获取植被覆盖度，并提供丰富的历史数据。两种遥感技术的综合应用为探究岛状盐沼中潮沟与植被发育特征提供了强有力的技术支持。

在门头岗岛状盐沼的发育过程中，不同区域内潮沟的形态特征参数和植被的物种、覆盖度往往表现出不同甚至相反的相对关系。门头岗 B、C 区作为高程和发育时间接近的区域，植被的种类和覆盖度却有较大差异，与之相对应的是两区域各级潮沟的长度、密度的数值和变化规律差异明显，潮沟长度和密度与植被 *FVC* 呈现负相关。而在高程、发育时间和植被覆盖都接近的 A、D 区，各级潮沟网络的长度、密度以及曲率的数值和变化规律差异较小，且潮沟在曲率上与植被 *FVC* 呈正相关。这一结果表明，潮沟网络的长度和密度受到盐沼植被的种类与覆盖度的直接影响。在芦苇覆盖度较高的区域，密集的芦苇茎叶能有效减缓水流速度，并通过其发达的地下根系增强土壤的抗冲刷能力和稳定性[23]，从而抑制潮沟的发育。相比之下，翅碱蓬植株较矮，根系较短，即使在覆盖度较高的区域也未表现出对潮沟长度、密度发育的明显抑制性，反而促进了潮沟曲率的增加。潮沟密度和曲率与植被覆盖度的变化与前人的研究结果基本一致[25]。

同时，研究中还发现，优势物种均为翅碱蓬且 *FVC* 小于 0.8 的 B 区和 D 区，尽管发育时间

和高程不同，但潮沟等级发育率的规律却相同，即 T_i 逐级减半，不同之处在于发育时间更长、高程更大的 B 区 T_1 接近 100%。当 *FVC* 超过 0.8，甚至达到 1.0 时（如 C 区），该规律发生改变，此时高大且密集的芦苇表现出对潮沟等级发育的抑制性，芦苇成为限制潮沟等级（尤其是 2 级以上潮沟）发育的主要因素。据此推断，在潮沟的发育过程中，当植被的定植时间较短或者覆盖度较低时，潮沟等级发育率 T_i 表现为逐级减半，随着发育时间的增加，T_1 逐渐接近 100%。然而，当植被的定植时间较长且覆盖度较高时，T_i 的变化与植被物种密切相关。例如，A 区的翅碱蓬覆盖度较高，其潮沟系统 T_1 达到 90%，接近于 B 区，表明密集的翅碱蓬有助于促进 1 级潮沟发育下级潮沟。相反，C 区的芦苇数量较多且覆盖度接近 1.0，导致潮沟系统 T_i 明显偏小，表现为密集的芦苇抑制了潮沟网络等级的发育。

此外，门头岗 A、B、D 三个区域内，翅碱蓬分布与潮沟边缘的距离表现出截然不同的 3 种分布模式。结合盐沼中潮沟和植被发育过程推测，3 种模式的形成可能与发育时间和水动力强度有关。盐沼发育初期，潮沟尺度较小且内部水动力较弱，植被种子随着潮沟内的水流进入盐沼后多集中在潮沟边缘附近定植。对于发育时间较长的盐沼，潮沟尺度大、内部水动力强，植被种子受水流冲刷影响，在潮沟附近难以存留或定植，植被生长区开始远离潮沟，潮沟边缘出现光滩。而植被在潮沟间均匀分布的模式则处于以上两种模式的过渡阶段。从历史遥感影像中观察到，B 区自 2013 年起就呈现出翅碱蓬远离潮沟 5 ~ 10 m 生长的模式，并一直保持至今。相比之下，D 区的翅碱蓬分布模式在 2022—2023 年发生了变化，翅碱蓬从潮沟边缘向滩面转移。此外，无人机地形高程测量结果显示，2023 年 D 区盐沼边缘的高程增加了 10 ~ 20 cm，导致区域内潮沟的深度相应增加，沟内水动力增强，进而影响了翅碱蓬的分布模式。因此，可以推断，在这三种模式中，翅碱蓬远离潮沟 5 ~ 10 m 生长的模式相对稳定，其他两种为非稳定模式，可能随时间或其他扰动而发生转变。

3 结 论

（1）在岛状盐沼的潮沟系统中，发育时间较长的区域内潮沟等级发育率逐级减半，且 T_1 接近 100%，密集的芦苇会抑制潮沟等级的发育。翅碱蓬 *FVC* 较高的区域，各级潮沟长度、密度逐级减少且各级间差异较小；芦苇 *FVC* 较高的区域，各级潮沟长度、密度逐级减少且各级间差异较大；翅碱蓬 *FVC* 较低的区域，潮沟长度、密度的峰值在 2、3 级潮沟。（2）不同物种、覆盖度的植被对潮沟曲率有不同的影响。翅碱蓬覆盖度与各级潮沟曲率呈正相关，芦苇覆盖度与各级潮沟曲率呈负相关。（3）2 级潮沟与主潮沟夹角随发育时间的增加逐渐接近正态分布且峰值在 [70°~90°]。（4）翅碱蓬分布与潮沟距离存在 3 种模式：植被远离潮沟 5 ~ 10 m 分布、植被集中在潮沟边缘、植被分布与潮沟距离无明显相关性，后两种模式之间可以发生转化。

参考文献：

[1] BELLIARD J P, TEMMERMAN S, TOFFOLON M. Ecogeomorphic relations between marsh surface elevation and vegetation properties in a temperate multi - species salt marsh[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(6): 855-865.

[2] D'ALPAOS A. The mutual influence of biotic and abiotic components on the long-term ecomorphodynamic evolution of salt-marsh ecosystems[J]. Geomorphology, 2011, 126(3/4): 269-278.

[3] XIN P, WILSON A, SHEN C J, et al. Surface water and groundwater interactions in salt marshes and their impact on plant ecology and coastal biogeochemistry[J]. Reviews of Geophysics, 2022, 60(1): e2021RG000740.

[4] TEMMINK R J M, LAMERS L P M, ANGELINI C, et al. Recovering wetland biogeomorphic feedbacks to restore the world's biotic carbon hotspots[J]. Science, 2022, 376(6593): 594.

[5] 邵虚生. 潮沟成因类型及其影响因素的探讨 [J]. 地理学报, 1988, 43(1): 35-43.

[6] GONG Z N, MOU K N, WANG Q W, et al. Parameterizing the Yellow River Delta tidal creek morphology using automated extraction from remote sensing images[J]. Science of The Total Environment, 2021, 769: 144572.

[7] 黄琬淳, 李玉凤, 周诗薇, 等. 基于无人机遥感的潮沟分异与植被及地形关系研究 [J]. 海洋学报, 2023, 45(5): 107-117.

[8] BIJ DE VAATE I, BRÜCKNER M Z M, KLEINHANS M G,

et al. On the impact of salt marsh pioneer species - assemblages on the emergence of intertidal channel networks[J]. Water Resources Research, 2020, 56(3): e2019WR025942.

[9] TANG Y N, MA J, XU J X, et al. Assessing the impacts of tidal creeks on the spatial patterns of coastal salt marsh vegetation and its aboveground biomass[J]. Remote Sensing, 2022, 14(8): 1839.

[10] 骆 梦, 王 青, 邱冬冬, 等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2018, 54(1): 17-24.

[11] CHEN K X, QU L M, CONG P F, et al. Quantifying the impact of hydrological connectivity on salt marsh vegetation in the Liao river delta wetland[J]. Wetlands, 2023, 43(5): 45.

[12] FISCHER J M, REED-ANDERSEN T, KLUG J L, et al. Spatial pattern of localized disturbance along a Southeastern salt marsh tidal creek[J]. Estuaries, 2000, 23(4): 565-571.

[13] TURNER P A, STREEVER W J. Changes in productivity of the saltmarsh mosquito, *Aedes vigilax* (Diptera: Culicidae), and vegetation cover following culvert removal[J]. Australian Journal of Ecology, 1999, 24(3): 240-248.

[14] FLERI J R, LERA S, GEREVINI A, et al. Empirical observations and numerical modelling of tides, channel morphology, and vegetative effects on accretion in a restored tidal marsh[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(11): 2223-2235.

[15] WU Y N, LIU J K, YAN G X, et al. The size and distribution of tidal creeks affects salt marsh restoration[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 259: 110070.

[16] LI X Z, LEI G C, LI Y L, et al. Assessing hydrodynamic effects of ecological restoration scenarios for a tidal-dominated wetland in Liaodong Bay (China)[J]. Science of The Total Environment, 2021, 752: 142339.

[17] GONG Z N, WANG Q W, GUAN H L, et al. Extracting tidal creek features in a heterogeneous background using Sentinel-2 imagery: a case study in the Yellow River Delta, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(10): 3653-3676.

[18] 郝向磊, 邓 磊, 贺 英. 盘锦湿地翅碱蓬景观变化的遥感监测与分析 [J]. 湿地科学与管理, 2017, 13(4): 31-36.

[19] HOU W H, ZHANG R J, XI Y B, et al. The role of waterlogging stress on the distribution of salt marsh plants in the Liao River estuary wetland[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 23: e01100.

[20] 朱龙海, 吴建政, 胡日军, 等. 近 20 年辽河三角洲地貌演化 [J]. 地理学报, 2009, 64(3): 357-367.

[21] GRAVELIUS H. Grundrifi der gesamten gewcisserkunde. Band I: flufikunde (compendium of hydrology, Vol I rivers, in German)[M]. Berlin: Guschen, 1914.

[22] 江 琪, 季 民. 淮北市植被覆盖度提取及时空变化分析研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(10): 85-88.

[23] 沈永明, 张忍顺, 王艳红. 互花米草盐沼潮沟地貌特征 [J]. 地理研究, 2003, 22(4): 520-527.

[24] 牟奎南, 宫兆宁, 邱华昌. 黄河三角洲潮沟网络形态特征的时空分异规律及其发育过程 [J]. 地理学报, 2021, 76(9): 2312-2328.

[25] 郑宗生, 周云轩, 田 波, 等. 植被对潮沟发育影响的遥感研究: 以崇明东滩为例 [J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 117-124.

（本文编辑：曲丽梅）